

# Charakteristika matematického modelování procesu spalování dřevní hmoty v aplikaci na model ohniště krbových kamen

Michal Branc, Marián Bojko

## Anotace

*Příspěvek se zabývá charakteristikou matematického modelu procesu spalování dřevní hmoty v aplikaci na model ohniště krbových kamen. K numerické simulaci definovaného modelu byl použit software Fluent, který řeší vícerozměrné proudění včetně chemických reakcí a sdílení tepla. Komplexní definice matematického modelu spalování kusového pevného paliva představuje složitý proces, který se v současné době řeší různými CFD programy (např. Fluent) na základě zjednodušení. Z těchto důvodů byl proces spalování definován jako reakce plynných složek (prchavé hořlaviny) uvolňovaných z paliva a kyslíku z přiváděného vzduchu. Spalování prchavé hořlaviny je dáno stechiometrickou rovnicí. Pro řešení těchto jevů byl vybrán odpovídající matematický model procesu spalování. Výstupy numerické simulace jsou vyhodnoceny pomocí teplotních a koncentračních polí ve spalovacím prostoru. Výsledný model lze po úpravách aplikovat na roštová energetická zařízení větších výkonů spalující dřevní hmotu.*

## Úvod

V rámci projektu „Krbová kamna pro nízkoenergetické domy“ - FI-IM3/185 byl vytvořen matematický model krbových kamen s cílem určení skutečného proudového pole při spalování polen v prototypu krbových kamen. Tento model si klade za cíl určit proudové pole a pomocí něj nastínit možnosti úprav jednotlivých částí krbových kamen pro dosažení co nelepších environmentálních a termických parametrů krbových kamen.

Dřevo a biomasa obecně jsou sice považovány za ekologické palivo, při jejich spalování však vznikají zdraví škodlivé látky. Jedná se především o tuhé znečišťující látky, oxid uhelnatý a polyaromatické uhlovodíky. Obzvláště oxid uhelnatý a další organické látky mohou vznikat ve velkém množství pokud spalovací proces a spalovací zařízení nejsou uzpůsobeny pro spalování takového paliva, jakým je biomasa. Produkce škodlivin v těchto případech rozhodně není zanedbatelná, ale stává se naopak velkým problémem pro místním ovzduší.

Spalování dřeva v krbových kamnech lze charakterizovat množstvím fyzikálních jevů. Jedná se o proudění spalovacího vzduchu přívodu vzduchu, dále reakce vzduchu (kyslíku) s palivem, vývin tepla a proudění směsi plynů (spalin) ohništěm, přičemž se uvolňuje tepelná energie. Při tomto procesu dochází ke sdílení tepla mezi stěnami, spaliny a plamenem, a to všemi známými způsoby sdílení tepla – vedením, prouděním a sáláním. Směr tepelných toků není během spalování jednosměrný, ale v době intenzivního hoření předávají spaliny teplo stěnám kamen a v době dohořívání naopak stěny a vyzdívky ohřívají spaliny. Spalování paliva (dřeva) je složitým dějem samo o sobě. Část tepla se uvolňuje spalováním fixního uhlíku na povrchu polena. Jedná se o heterogenní reakce, které jsou velice složité, přičemž do ní zasahuje řada jiných složek (např.  $H_2O$ ) a reakce probíhá v několika stupních. Většina energie se uvolňuje v oblasti nad palivem, kde hoří prchavá hořlavina uvolněná z paliva. Tento podíl tvoří většinový podíl uvolněné energie. Složitost popisu hoření této prchavé hořlaviny spočívá v tom, že prakticky není známo složení této prchavé hořlaviny, což se odráží v nedostatečném určení jejích fyzikálních vlastností. Dále je nutné podotknout, že proces hoření není kontinuální, jelikož se na průběhu spalování odráží periodický způsob přikládání paliva. Průběh tak vykazuje po přiložení prudce vzrůstající a následně pozvolně klesající tendenci rychlosti hoření, od které se odvíjí okamžitý výkon kamen.

Jak nastiňuje uvedený odstavec, proces spalování v malých ohništích je v mnoha ohledech obtížněji popsitelný než proces v ohništích většího výkonu. U spalovacích zařízení většího výkonu probíhá proces téměř kontinuálně, jednotlivé oblasti termických procesů (sušení, pyrolýza, zplynění a

hoření fixního uhlíku) zůstávají v prostoru neměnné a velkou výhodou jsou větší rozměry a známé průtoky vzdušín.

### **Technický popis kamen**

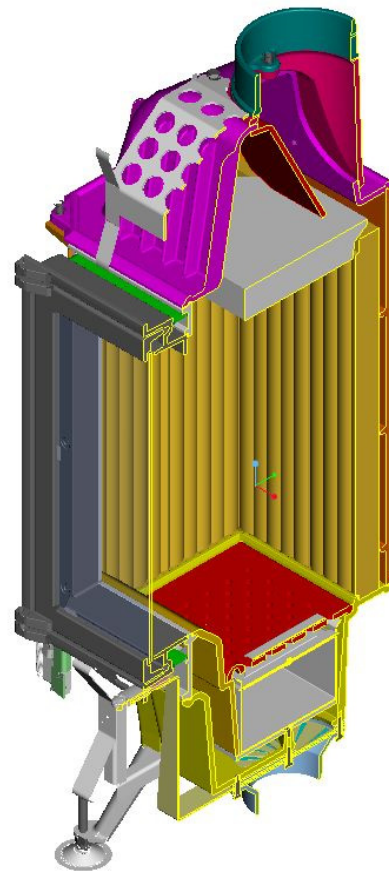
Krbová kamna byla vyvíjena pro potřeby vytápění či přitápění v nízkoenergetických domech, a vyznačují se proto několika charakteristickými konstrukčními prvky.

Hlavním konstrukčním prvkem je centrální přívod spalovacího vzduchu, který umožňuje napojení automatického regulátoru spalování a zároveň umožňuje externí přívod spalovacího vzduchu. Možnost externího přívodu vzduchu je podstatná pro zachování nízkých tepelných ztrát vytápěného objektu větráním. Externí přívod spalovacího vzduchu dále řeší problém s pronikáním kouře do místnosti z důvodu velké těsnosti oken a dveří v nízkoenergetických domech. Spalovací vzduch se v kamnech dělí na primární a sekundární, který představuje také ofuk skla.

Celkové konstrukční uspořádání ohniště a teplosměnných ploch je navrženo pro snížený výkon kamen s ohledem na potřeby nízkoenergetických domů. Jedná se o výkon 3 až 5 kW. Ohniště je vyloženo šamotovými deskami, které přispívají k nízkým emisním parametrům spalovacího procesu.

Samočinné přivíráání dvířek představuje konstrukční prvek zvyšující provozní bezpečnost těchto kamen.

Řez kamny zachycuje obrázek č. 1. Níže popsaný matematický model je však aplikován na poslední verzi prototypu s šikmou stropní šamotovou deskou a bez vratné plechové desky.



OBRÁZEK Č. 1 ŘEZ PRVNÍM PROTOTYPEM KAMEN

### **Výpočty**

Jako předpokládané palivo bylo uvažováno bukové dřevo o následujícím složení, viz. tabulka č. 1. Dle předpokladu, že prchavá hořlavina představuje 73 % hořlaviny, kdy zbytek do 100 % je dán fixním uhlíkem, bylo určeno složení prchavé hořlaviny. To bylo dále přepočítáno na původní vlhkost paliva. S tímto složením bylo dále uvažováno a byly určeny stechiometrické koeficienty, určena teoretická spotřeba kyslíku a vzduchu, určena teoretická produkce spalin a složení spalin. Pro předpokládaný příkon byla dále definována potřeba kyslíku, produkce spalin a jednotlivých složek, viz. tabulka č. 2.

### **Definice matematického modelu**

Problematiku proudění v krbových kamnech lze charakterizovat jako turbulentní nestlačitelné proudění směsi plynných příměsí v celém prostoru kamen, kdy dochází ke spalování prchavé hořlaviny s kyslíkem za vzniku produktů spalování ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ). Kromě toho je uvažován přenos tepla. Jedná se o velice komplexní model, který realisticky simuluje proces hoření dřevěných polen v ohništi krbových kamen.

Navržené složení (%)		Surové palivo		Prchavka	Prchavka + voda	
$A^r$	<b>1,00</b>	$Q_i^r$	15105	-	-	kJ/kg
$W^r$	<b>12,00</b>	$A^r$	1,00	0,00	0,00	% hm.
$V^{daf}$	<b>73,00</b>	$W^r$	12,00	0,00	16,67	% hm.
$C^h$	<b>51,00</b>	$C^r$	44,37	27,00	22,50	% hm.
$H^h$	<b>6,20</b>	$H^r$	5,39	9,24	7,70	% hm.
$N^h$	<b>0,60</b>	$N^r$	0,52	0,89	0,74	% hm.
$O^h$	<b>42,20</b>	$O^r$	36,71	62,87	52,39	% hm.
$S^h$	<b>0,00</b>	$S^r$	0,00	0,00	0,00	% hm.
celkem hořlavina	100,00	celkem palivo	100,00	100,00	100,00	% hm.

TABULKA Č. 1 SLOŽENÍ PŘEDPOKLÁDANÉHO PALIVA

Přebytek vzduchu	Rychlost hoření	Spotřeba kyslíku teoretická	Vzduch skutečný	Produkce spalin z polena			Spaliny skutečné		Tepelný příkon
				$CO_2$	$N_2$	$H_2O$	$V_{sp-sk} (suché)$	$V_{sp-sk} (vlhké)$	
n	$w_H$	$O_{2-t}$	$V_{vz-sk} (suchý)$	$CO_2$	$N_2$	$H_2O$	$V_{sp-sk} (suché)$	$V_{sp-sk} (vlhké)$	$P_K$
-	kg/s	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kW
2,000	-	0,687	5,925	0,83	0,01	0,85	6,070	6,925	-
	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s	kW
	0,000265	0,000182	0,001569	0,000218	0,000002	0,000226	0,001608	0,001834	4,000

TABULKA Č. 2 TEORETICKÁ PRODUKCE SPALIN A SKUTEČNÁ POTŘEBA KYSLÍKU

Definovaný matematický model představuje soustavu parciálních diferenciálních rovnic, které byly řešeny programem Fluent 6.3.26, který je založen na metodě konečných objemů, kdy výpočetní oblast (v tomto případě krbové kamna) se vyplní elementy konečných prvků (šestistěny, čtyřstěny), ve kterých se provádí numerická simulace definovaného modelu. Matematický model definuje základní bilanční rovnice [1]:

$$\text{Rovnice kontinuity} \quad \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\text{Navier-Stokesovy rovnice} \quad \frac{\partial(u_j u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j^2} + f_i \quad (2)$$

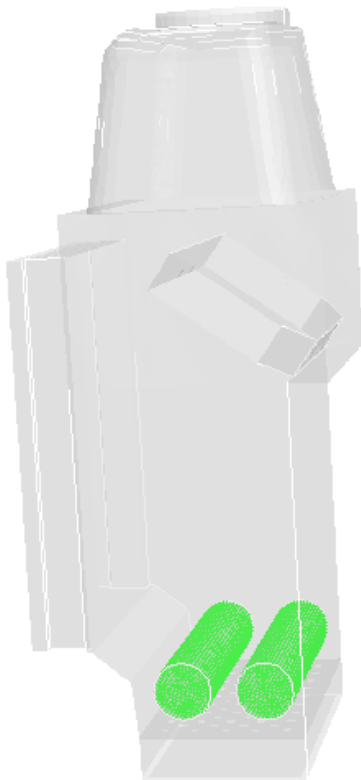
$$\text{Rovnice příměsí} \quad \frac{\partial(\rho \bar{u}_j Y_{i'})}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} J_{j,i'} + R_{i'} + S_{i'} \quad (3)$$

$$\text{Rovnice energie} \quad \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j c_p T) = \bar{u}_j f_j + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{j,i} \bar{u}_j)}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

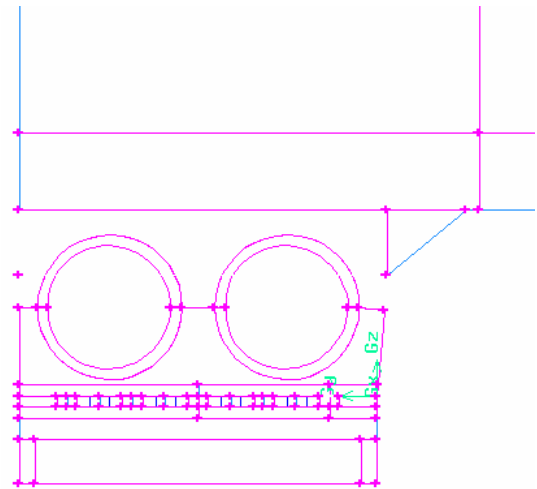
K numerické simulaci proudění byl použit turbulentní  $k-\varepsilon$  STANDARD model, který navíc řeší rovnice pro turbulentní kinetickou energii  $k$  a rychlost disipace  $\varepsilon$  [1]. V rovnici příměsí (3) byla definována rychlost produkce ( $R_{i'}$ ) příměsí  $i'$  vlivem chemické reakce (spalování prchavé hořlaviny).

Spalování je v této aplikaci definováno pro plynné složky v celém prostoru kamen. Jsou uvažována dvě polena válcového tvaru, která leží na roštu kamen, viz. obrázek č. 2. Každé poleno je rozdělené na dvě části. Vnitřní část polena je tvořena dřevní hmotou o definovaných fyzikálních vlastnostech. Vnější část polena je tvořena vrstvou, ze které se uvolňuje prchavá hořlavina, viz. obrázek č. 3. V této oblasti je definován zdrojový člen (SOURCE TERM) uvolňující prchavou hořlavinu. Proces spalování prchavé hořlaviny je definován modelem EDDY-DISSIPATION, kdy rychlost hoření je dána rychlostí směšování kyslíku s prchavou hořlavinou. Definujeme stechiometrickou rovnici spalování prchavé hořlaviny s kyslíkem za vzniku oxidu uhličitého a vodní páry (prchavá látka +  $O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ ). Výše definované rovnice byly následně rozšířeny o radiační model (DISCRETE ORDINATES).

K tvorbě výpočetní sítě byl použit program Gambit. S ohledem na složitost geometrie kamen byl celý prostor kamen síťován v několika oddělených objemech a celkový počet konečných objemů je 868680.



OBRÁZEK Č. 2 KRBOVÁ KAMNA VČETNĚ UMÍSTĚNÍ POLEN



OBRÁZEK Č. 3 PROVEDENÍ POLEN KRBOVÝCH KAMEN (VNITŘNÍ A VNĚJŠÍ ČÁST)

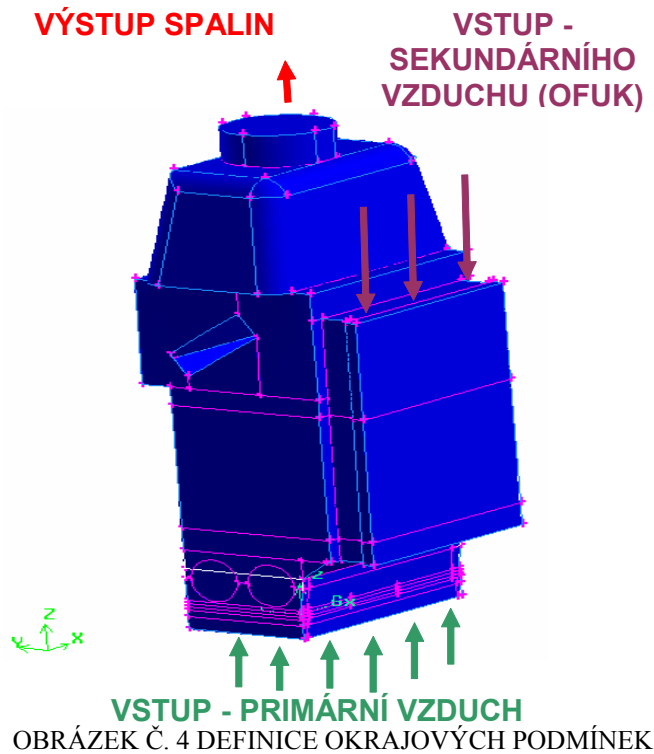
### **Definování okrajových podmínek a plynné směsi**

S ohledem na složitost přívodu sekundárního vzduchu do oblasti kamen, nebyly uvažovány vzduchové kanály, kterými je přiváděn sekundární vzduch pro ofuk skla. Místo toho byla definována tlaková podmínka (PRESSURE-INLET) pro vstup sekundárního vzduchu do kamen na horní ploše vstupních dveří kamen ( $p = -8,5 \text{ Pa}$ ).

Pro vstup primárního vzduchu do prostoru kamen skrz rošt byla definována průtoková okrajová podmínka (MASS-FLOW-INLET) na ploše mezi popelníkem a tělesem kamen, kterou ve skutečnosti primární vzduch prochází do prostoru kamen. Na výstupu z krbových kamen je definována tlaková podmínka (PRESSURE-OUTLET,  $p = -10 \text{ Pa}$ ).

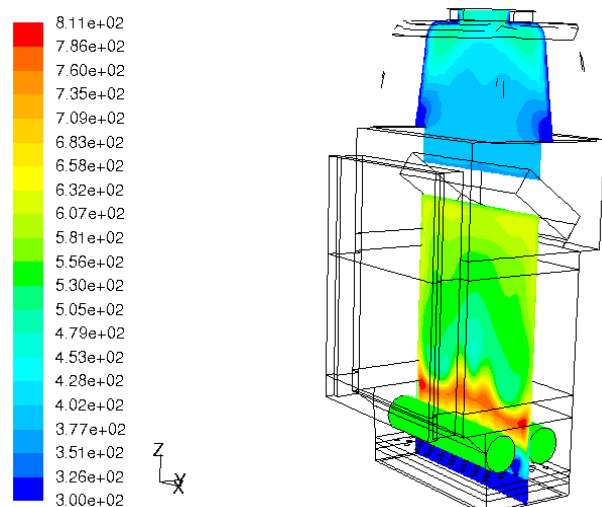
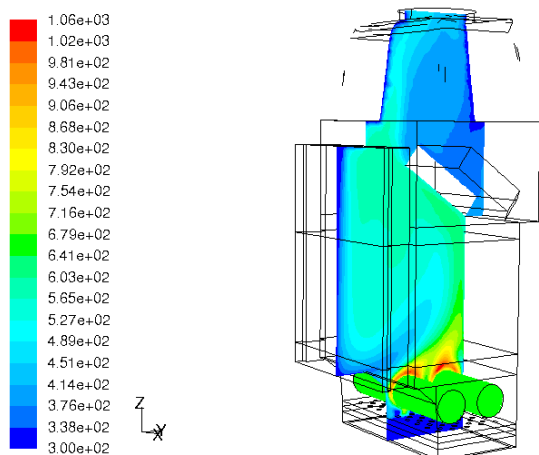
Proudící směs je definována následujícími složkami ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , prchavá hořlavina). Na vstupu do krbových kamen, tedy pro vstup primárního a sekundárního (ofuk skla) vzduchu je definován vzduch ( $23\% = \text{O}_2$ ,  $77\% = \text{N}_2$ ).

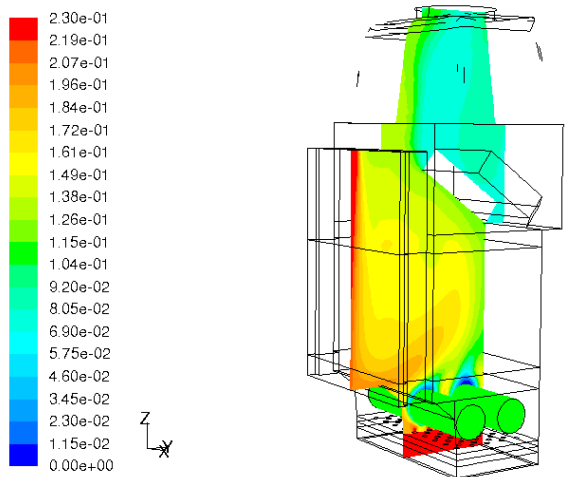
Fyzikální vlastnosti (hustota, měrná tepelná kapacita, viskozita a tepelná vodivost) jednotlivých složek jsou definovány v závislosti na teplotě.



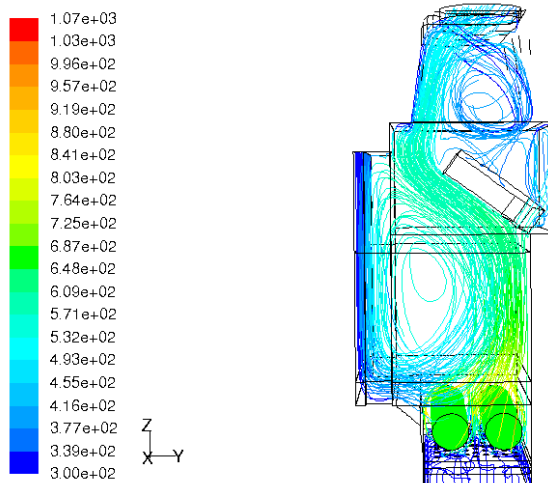
### Vyhodnocení numerické simulace v krbových kamnech

K vyhodnocení numerické simulace byly vytvořeny dva svislé řezy v ose roštu. Vyhodnocené jsou základní proudové veličiny ve dvou svislých řezech, které jsou navzájem kolmé. Zobrazeno je teplotní pole, rozložení hmotnostního zlomku kyslíku a proudnice primárního a sekundárního vzduchu. Jak ukazuje obrázek č. 5 a obrázek č. 6, teplotní pole je zobrazeno v příslušných řezech. Z výsledků je patrné, že maximální dosažená teplota při spalování se pohybuje kolem 1060°C a z teoretických pramenů vyplývá, že maximální teplota při spalování dřeva dosahuje asi 1100°C, což znamená, že daný model dobře vystihuje teplotní pole ve spalovací komoře. Maximální dosažená teplota je v oblasti kolem povrchu polen. Dále je z výsledků patrné, že teplota uprostřed kamen je kolem 500°C.



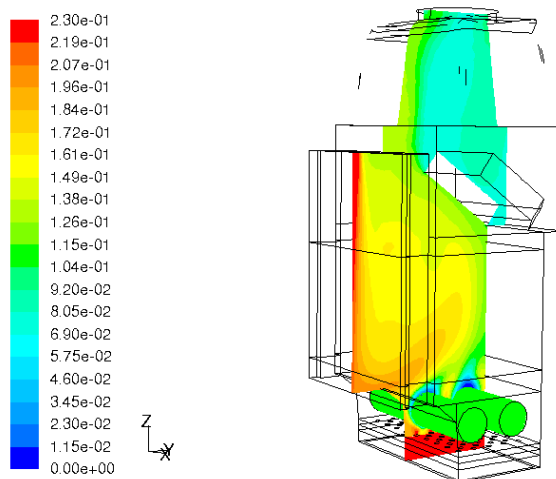


OBRÁZEK Č. 7 PRŮBĚH HMTONSTNÍHO ZLOMKU  $O_2$  VE SVISLÉ ROVINĚ OSOU ROŠTU (1)



OBRÁZEK Č. 8 PROUDNICE PRIMÁRNÍHO A SEKUNDÁRNÍHO VZDUCHU OBARVENÉ TEPLOTOU

POLE HMTONSTNÍHO ZLOMKU KYSLÍKU ZOBRAZUJE



obrázek č. 7. Z obrázku je patrný postupný úbytek kyslíku díky reakci s prchavou hořlavinou. Úbytek kyslíku je výraznější v oblastech, kde probíhá reakce rychleji. V oblasti odtahu je patrný výrazný úbytek kyslíku. Jak uvádí obrázek č. 8, proudové pole vytváří jakýsi vír s horizontální osou rotace. Tento jev byl pozorován i při experimentálních zkouškách. Spaliny dále po opuštění narážejí na přední část litinového víka, kde se proudnice zhušťují a dochází k urychlení proudění. Dále lze konstatovat, že zadními otvory v šikmé šamotové desce proudí minimální množství spalin.

Díky měření na prototypu křbových kamen mohlo být provedeno porovnání výsledků modelu se skutečným zařízením. Představený model dobře vystihuje proudění i hoření v ohništi. Nespálený podíl prchavé látky, který při skutečném spalování představuje oxid uhelnatý a ostatní organické látky, odpovídal měřeným hodnotám, stejně jako teplota na výstupu z prototypu.

### **Aplikace na větší zařízení**

Představený model je aplikovatelný na roštová energetická zařízení větších výkonů spalující dřevní hmotu. Uvedený obrázek č. 9 pomůže definovat odlišnosti od ohniště malých výkonů. Obrázek zachycuje kotel typu VESCO-B, u kterého jsou pro ilustraci dokresleny boční přívody sekundárního vzduchu. Odlišnost se týká prakticky jen definování oblastí s jednotlivými termickými procesy a určení vlastností a zdrojových členů v těchto oblastech:

- fyzikální vlastnosti – tlaková ztráta, tepelná kapacita, absorpční součinitel,
- energetické zdroje – velikost, produkce či spotřeba energie,
- zdroje příměsí – druhy a množství uvolňovaných příměsí, spotřeba kyslíku.

Ve skutečnosti nejsou jednotlivé oblasti striktně odděleny, uvedená specifikace však nebude představovat významné zkruslení.

Jak uvádí obrázek č. 9, vrstva paliva je rozdělena do čtyř oblastí, ale je možné ji rozdělit do více oblastí. Díky kontinuálnímu přívodu paliva zůstávají jednotlivé oblasti v prostoru neměnné, což je oproti dávkovému spalování zjednodušení.

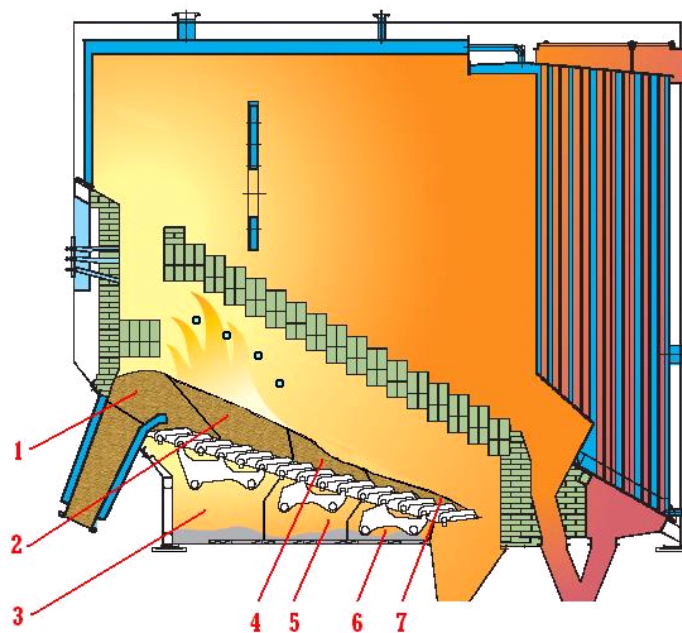
Pozice 1, viz. obrázek č. 9, představuje oblast, ve které převažuje ohřev a sušení paliva. Pro řešení matematické simulace je proto zapotřebí definovat zdrojový člen vody, odpovídající změně vlhkosti paliva před vstupem do další oblasti. Výparnému teplu vody a ohřevu paliva pak musí odpovídat spotřeba energie v dané oblasti.

Pozice 2 představuje oblast s intenzivním uvolňováním prchavé hořlaviny (objemový zdroj prchavé hořlaviny), která následně hoří nad vrstvou paliva. Termické procesy uvnitř vrstvy je možné zahrnout do tepelného zdroje, což způsobí dodatečné ohřátí vrstvy. Reakce prchavky s kyslíkem však probíhá i uvnitř vrstvy, která je pórovitá, a vrstva se tak ohřívá.

Pozice 4 představuje obdobnou oblast jako v předchozím případě, uvolňování prchavé látky však bude méně intenzivní. Lišit se bude také intenzita zdroje energie.

Pozice 7 pak představuje oblast dohořívání fixního uhlíku, která je charakterizována objemovým zdrojem energie, spotřebou kyslíku a uvolňováním oxidu uhličitého.

U uvedených oblastí je nutné definovat odpovídající tlakové ztráty, velikosti částic a množství přiváděného vzduchu pod rošt. Je nutné bez velkých zjednodušení dodržet celkové energetické a chemické bilance celé vrstvy paliva na roštu. Důležitým parametrem bude specifikace reflexních ploch a zdrojů tepelného záření.



1 – zóna ohřevu a sušení, 2- oblast intenzivního uvolňování prchavé hořlaviny, 3 – primární vzduch I. stupně, 4 – oblast mírného uvolňování prchavé hořlaviny, 5 – primární vzduch II. stupně, 6 - primární vzduch III. stupně, 7 – oblast dohořívání fixního uhlíku

OBRÁZEK Č. 9 APLIKACE NA KOTEL VĚTŠÍHO VÝKONU TYPU VESKO-B

## Závěr

Cílem představeného matematického modelu bylo určení proudové pole a pomocí něj nastínit možnosti úprav jednotlivých částí krbových kamen pro dosažení co nelepších environmentálních a termických parametrů krbových kamen. Model velice reálně vystihl proces proudění a zároveň proces hoření biomasy v ohništi, a proto je možné se domnívat, že uvedený přístup a matematický model je s uvedenými modifikacemi úspěšně aplikovatelný na zařízení většího výkonu. Procesy ve větším zařízení jsou z pohledu modelování jednodušší, jelikož se jednotlivé oblasti nemění v čase, proces je

kontinuální, pracuje se většími rozměry a díky nucenému přívodu vzduchu jsou známy jednotlivé průtoky.

### **Literatura:**

[1] Kozubková, M.: *Modelování proudění - Fluent I*, VŠB-TU Ostrava, 2008. 150 s., <URL:<http://www.338.vsb.cz>>.

### **Kontaktní adresy autorů**

**Ing. Michal Branc**, Výzkumné energetické centrum VŠB-TU Ostrava, 17.listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: 597 323 852, mail: [michal.branc@vsb.cz](mailto:michal.branc@vsb.cz), [www.vsb.cz/vec](http://www.vsb.cz/vec)

**Ing. Marián Bojko, Ph.D.**, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení VŠB-TU Ostrava, 17.listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba, tel:597 324 385, mail:[marian.bojko@vsb.cz](mailto:marian.bojko@vsb.cz), [www.338.vsb.cz](http://www.338.vsb.cz)